

Электровзрывное разрушение сборки из параллельных металлических проволочек с разной проводимостью

А. С. Скрябин, А. В. Павлов, В. Д. Телех, А. М. Картова

Представлены результаты исследования процессов, имеющих место при электрическом взрыве двух соединенных параллельно металлических проволочек. Экспериментальной моделью служили проволочные сборки из никеля и титана длиной $\approx 9\text{--}10$ см с эквивалентным сопротивлением $\approx 0,6\text{--}1,3$ Ом. Ввод энергии осуществлялся от ёмкостного накопителя с помощью тиратронного коммутатора. Характерные значения амплитуды тока составляли $\approx 0,9\text{--}1,2$ кА, что вызывало появление термоупругих волн, разрушающих проводник. Интегральные и шлирен-фотографии процесса взрыва позволили установить особенности внутренней структуры генерируемых взрывом течений, включая формирование ячеистой структуры за счет взаимодействующих ударных волн. В продуктах разрушения проволочныхборок были обнаружены металлические частицы с характерным размером $0,1\text{--}30$ мкм.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, ударные волны, шлирен-фотография.

Ссылка: Скрябин А. С., Павлов А. В., Телех В. Д., Картова А. М. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 40.

Reference: A. S. Skriabin, A. V. Pavlov, V. D. Telekh, and A. M. Kartova, Applied Physics, No. 6, 40 (2020) [in Russian].

Введение

К настоящему времени накоплен значительный опыт [1] исследования электровзрывного диспергирования металлических волокон. В основном исследования носят либо фундаментальный характер в части изучения методов генерации ударных волн [2], мощного излучения [3], а также пинчей [4], либо в практических приложениях для получения частиц металлов [5] и т. д. Получен ряд важных результатов [6, 7], в основном касающихся физики процесса. При этом в прошлом и сей-

час используется широкий спектр различных экспериментальных методик, среди которых активно применяются методы, которые позволяют не только визуализировать особенности внутренней структуры, но получить количественные результаты о свойствах генерируемых течений [8]. Сочетание различных методик (прежде всего, бесконтактных оптических) представляется весьма перспективным благодаря комплексности получаемых данных.

В настоящее время электрический взрыв проводников (ЭВП) рассматривается как перспективный процесс не только для получения моноэлементных частиц при диспергировании одиночных [5] проволочек, но и для получения частиц сложного химического состава при взрывеборок параллельно [9] соединенных проводников. Необходимо отметить, что процессы при ЭВП таких систем могут иметь крайне сложный характер, что вызвано в т. ч. различием в электрофизических, теплофизических и др. свойствах проволок, составляющих сборку.

Скрябин Андрей Станиславович, к.т.н., доцент.
 Павлов Алексей Вячеславович, инженер.
 Телех Виктор Дмитриевич, к.т.н., доцент.
 Картова Анна Максимовна, магистр.
 МГТУ им. Н. Э. Баумана.
 Россия, 105005, Москва, 2^{ая} Бауманская ул., 5/1.
 E-mail: terra107@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2020 г.

© Скрябин А. С., Павлов А. В., Телех В. Д., Картова А. М., 2020

В данной работе изучен медленный (время энерговыделения $t_p \approx 50\text{--}100$ мкс) электрический взрыв сборки из никелевой и титановой проволоки. Такой режим характеризуется тем, что время t_p преобладает над временем развития неустойчивостей [10] в проводнике t_{in} . Изучение совместного взрыва таких волокон [11] (или фольг [12]) может представлять интерес при получении различных соединений, например, интерметаллидов. При этом исследования в области именно технологических направлений пока относительно малочисленны и информации недостаточно для создания соответствующих эффективных промышленных технологий.

Методика эксперимента

Экспериментальная установка для исследования электрического взрыва металлических проволочек подробно описана в [5] и создана на базе УНУ «Пучок-М» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Экспериментальная модель представляла собой две проволочки (Ti и Ni), соединённые параллельно в токопроводящих зажимах, и устанавливалась в разрядной камере с давлением среды (аргона или воздуха) $p \sim 1$ бар. Длина сборки составляла $\approx 9\text{--}10$ см. Расстояние между проволочками строго не фиксировалось (до 1 см) и определялось их натяжением. Начальное электрическое сопротивление никелевой проволоки составляло 0,7–1,5 Ом, титановой – 5,0–7,0 Ом. Эквивалентное сопротивление сборки было 0,6–1,3 Ом.

Напряжение заряда импульсного конденсатора (ёмкостью $C_0 = 0,6$ мкФ) составляло $U_0 = 5\text{--}8$ кВ. Коммутация цепи осуществлялась с помощью быстродействующего тиратрона (ОАО Импульсные технологии, г. Рязань). Параметры процесса отслеживались по осциллограммам тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ и методами Шлирен- [13] и интегральной фотографии. Интегральная фотография проводилась путём синхронизованного относительно срабатывания тиратрона (и роста тока) открытия затвора камеры «Видеоскан», выдержки в течение 100 мс и закрытия затвора камеры. Таким образом, интегральная фотография позволяет, в целом, получить данные о динамике процесса и местоположении на про-

лочке наиболее излучающих и, следовательно, наиболее нагретых областей.

Результаты экспериментов

На рисунке 1 показаны характерные осциллограммы тока $I(t)$, напряжения на конденсаторе $U_C(t)$ и на сборке $U_W(t)$. Упоминаемые в дальнейшем временные масштабы отсчитывались от начала роста тока. Отметим, что из осциллограммы относительно сложно заключить, какой проводник взрывается первым. Тем не менее, некоторые количественные представления о процессах она дает.

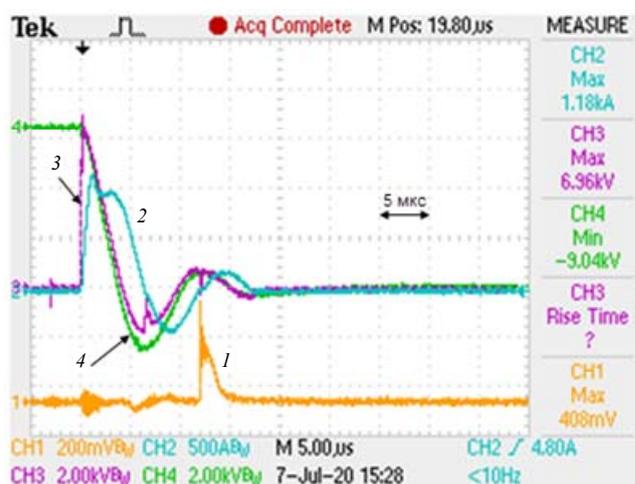


Рис. 1. Типичные осциллограммы электрического взрыва сборки параллельных Ni и Ti волокон: 1 – сигнал с фотодиода, 2 – $I(t)$, 3 – $U_W(t)$, 4 – $U_C(t)$.

Сложный характер зависимости $I(t)$ (несколько экстремумов во время первого полупериода) свидетельствует о том, что, по крайней мере, один проводник при нагреве диспергируется с образованием капельной и паровой фаз (за время до ≈ 2 мкс). Далее по мере расширения образовавшихся паров происходит незначительное падение тока (рост сопротивления токового канала), а далее происходит зажигание дугового разряда в парах в момент времени ≈ 3 мкс. Это приводит к возникновению второго максимума тока. На этой стадии характерное значение амплитуды тока составляло $\approx 0,9\text{--}1,2$ кА. Далее на зависимости $I(t)$ были зарегистрированы второй и третий полупериоды с прерыванием тока в момент времени 20–25 мкс от начала процесса, что свидетельствовало о полном разрушении про-

волочной сборки.

На рисунке 2 представлена интегральная фотография процесса электрического взрыва сборки Ni и Ti волокон. Видно, что процесс взрыва и разрушения сборки начинается достаточно локально – в местах перегрева проволок. Эти места на интегральной фотографии визуализированы как светящиеся области. Однако этих данных недостаточно для выяснения всех особенностей внутренней структуры генерируемых газодинамических течений.



Рис. 2. Интегральная фотография электровзрыва сборки.

На рисунке 3 изображены исходная сборка проволок и шлирен-фотография процесса взрыва. При этом при однозначной идентификации проволок возможно установить, какое из волокон диспергируется первым. Расстояние между электродами составляло 9 см. Момент съёмки определялся срабатыванием лазера, устанавливался по сигналу с фотодиода (см. рис. 1) и составлял в среднем 12–15 мкс от момента коммутации тока, что соответствовало относительно поздним стадиям разрушения сборки. На шлирен-фотографии (рис. 3, б) обнаруживаются все газодинамические структуры, характерные для медленного взрыва металлических проводников. Зарегистрирован фронт ударной волны (1), полученной в результате расшире-

ния в свободное пространство продуктов взрыва (2). Установлено, что в первую очередь происходит взрыв Ni проволоки (4), так как в момент регистрации (>10 мкс) от неё практически нет тени. При этом на фотографиях обнаруживается весьма слабая тень от Ti проволоки (3), разрушение которой происходит в самую последнюю очередь (после разрушения Ni проводника). Низкая контрастность её изображения свидетельствует о том, что проволока существенно уменьшилась в размерах, но, тем не менее, полностью не разрушена. Сложный характер разлёта продуктов взрыва, образующих крайне неоднородный профиль затенения кадра, обусловлен несколькими факторами. Во-первых, в связи с неидеальностью формы, изначально перегрев проволоки происходит в наиболее узком месте или в областях наличия других дефектов формы. Таким образом, эти места и являются источником первичных паров и капель (см. рис. 2). Во-вторых, реализованный в эксперименте медленный электрический нагрев приводит к возникновению термоупругих напряжений [14, 15], вызывающих образование деформации в исходных проводниках, что также влияло на движение продуктов взрыва. Большее затенение кадра в периферийной области продуктов взрыва вызвано большей концентрацией в ней капельной фазы. Отметим, что начальные области перегрева, визуализированные на интегральной фотографии как яркие сфероподобные области, генерируют квазисферические ударные волны, которые сливаются и формируют внутри течения сложную ячеистую структуру взаимодействующих скачков уплотнения (5).

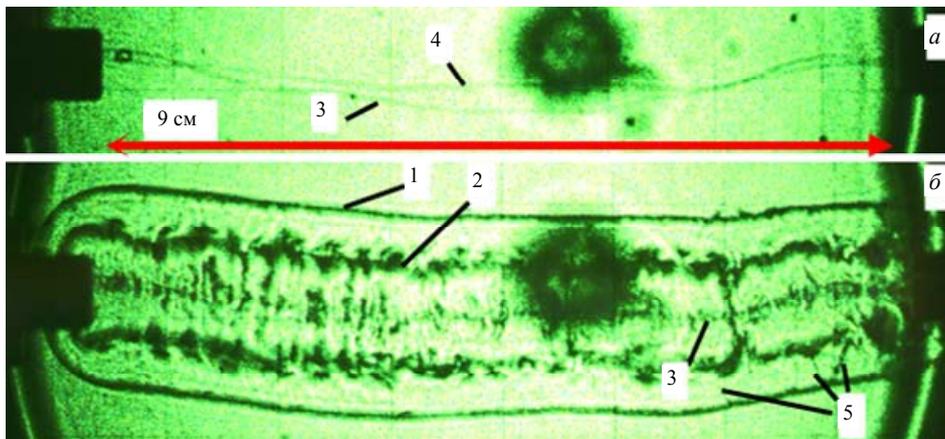


Рис. 3. Шлирен-фотографии исходной сборки (а) и процесса её взрыва (б) в момент ≈ 12 мкс: 1 – фронт ударной волны, 2 – продукты взрыва, 3 – Ti проволока и 4 – Ni проволока. Темное пятно – дефект линзы.

В продуктах взрыва обнаружены (см. рис. 4) мелкодисперсные металлические частицы (со средним размером $\approx 0,1\text{--}30$ мкм). Визуализация проведена на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioImager Z2m с конфокальной приставкой LSM700. Разрешение составляло до 0,1 мкм.

Достаточно сложная морфология поверхности частиц (неровности её профиля, наличие выступов) обусловлена сложностью процессов их формирования, включая как объёмную конденсацию паров, так и слияние мелкодисперсной капельной фазы, образованной на ранних стадиях взрыва волокон (за время $\approx 2\text{--}4$ мкс).

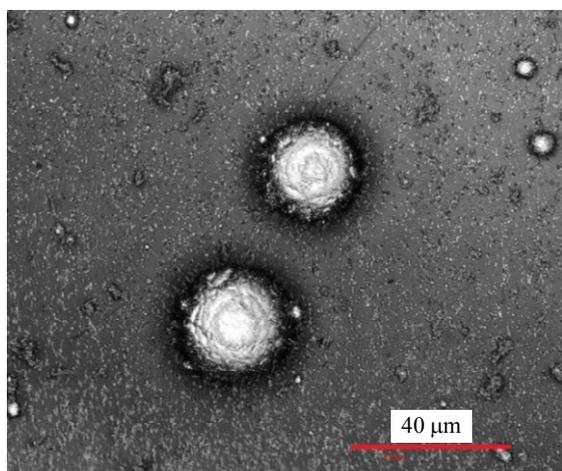


Рис. 4. Фотография зарегистрированных частиц в продуктах взрыва.

Заключение

Электрический взрыв параллельных металлических проводников с различными сопротивлениями (например, Ti и Ni) позволил получить достаточно сложные газодинамические структуры. Детальное исследование было выполнено с помощью ширен- и интегральной фотографии. Показано, что особенности формы и морфологии исходных волокон определяют начальную стадию взрыва, так как именно в местах с дефектами формы происходит перегрев и начальное диспергирование исходных металлических волокон. Далее в процесс взрыва и образования плазменного канала вовлекаются остальные участки проволоки. Однако начальная стадия процесса, связанная с неоднородностью перегрева проводников, вносит вклад во

внутреннюю структуру генерируемого течения на поздних стадиях, что приводит к формированию ячеек внутри потока, представляющих собой взаимодействие фронтов исходных квазисферических ударных волн. Эксперименты подтвердили эффективную генерацию паров и капель металла. Основными продуктами были металлические частицы диаметром от 0,1 до 30 мкм.

Работа выполнена с использованием УНУ «Пучок-М» МГТУ им. Н. Э. Баумана, при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному заданию 0705-2020-0046.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chace W. G., Moore H. K. Exploding wires. – New York: Plenum Press, 1962.
2. Sarkisov S. G., Caplier J., Parada F., Sotnikov V. I. // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 120. P. 123303.
3. Han R., Zhu W., Wu J., Li Ch., Zhang Ch., Cui R., He F., Ouyang J., Wang Ya., Ding W. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. Vol. 53. № 34. P. 345201.
4. Hammer D. A., Sinars D. B. // Laser and Particle Beams. 2001. Vol. 19. № 3. P. 377.
5. Skryabin A. S., Pavlov A. V., Kartova A. M., Telekh V. D., Sytchev A. E., Sachkova N. V., Serov M. M. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1250. P. 012018.
6. Tkachenko S. I., Mingaleev A. R., Romanova V. M., Ter-Oganes'yan A. E., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A. // Plasma Physics Reports. 2009. Vol. 35. № 9. P. 734.
7. Romanova V. M., Ivanenkov G. V., Mingaleev A. R., Ter-Oganesyan A. E., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A. // Plasma Physics Reports. 2015. Vol. 41. № 8. P. 617.
8. Lochte-Holtgreven W. Plasma diagnostics. – New York: Wiley, 1968.
9. Pervikov A., Glazkova E., Lerner M. // Physics of Plasmas. 2018. Vol. 25. P. 070701.
10. Oreshkin V. I., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Rousskikh A. G., Chaikovskii S. A. // High Temperature. 2012. Vol. 50. № 5. P. 584.
11. Орешкин В. В., Седой В. С., Чемезова Л. И. // Прикладная физика. 2001. № 3. С. 94.
12. Доровской В. М., Елесин Л. А., Столяров В. Л., Стеблевский А. В., Уруцкоев Л. И., Филлипов Д. В. // Прикладная физика. 2006. № 4. С. 28.
13. Павлов А. В., Протасов Ю. Ю., Телех В. Д., Щепанюк Т. С. // Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 3. С. 111.
14. Ternan J. // Physics Letters A. 1986. Vol. 115. № 5. P. 230.
15. Graneau P. // Physics Letters A. 1987. Vol. 120. № 2. P. 77.

Electric explosive destruction of assembly of parallel metall wires with different conductivity

A. S. Skriabin, A. V. Pavlov, V. D. Telekh, and A. M. Kartova

Bauman Moscow State Technical University
5/1 2^{ya} Baumanskaya ul., Moscow, 105005, Russia

Received October 19, 2020

The results of the processes study during an electric explosion of two parallel-connected metal wires are presented. Wire assemblies of nickel and titanium wires with a length of ≈ 9 –10 cm, and an equivalent resistance of ≈ 0.6 –1.3 Ohm, served as experimental models. Energy input was fulfilled from a capacitive storage using a thyatron switch. The characteristic values of the current amplitude were ≈ 0.9 –1.2 kA, which caused the appearance of thermoelastic waves, destroying the conductor. Integral and schlieren photographs of the explosion process made it possible to establish the features of the internal structure of the gas dynamics flows generated by the explosion, including the formation of a cellular structure due to interacting of shock waves. Metal particles with a characteristic size of 0.1–30 μm were found in the products of the assemblies destruction.

Keywords: electric explosion of conductors, shock waves, schlieren photography.

REFERENCES

1. W. G. Chace and H. K. Moore, *Exploding wires* (Plenum Press, New York, 1962).
2. S. G. Sarkisov, J. Caplier, F. Parada, and V. I. Sotnikov, *Journal of Applied Physics* **120**, 123303 (2016).
3. R. Han, W. Zhu, J. Wu, Ch. Li, Ch. Zhang, R. Cui, F. He, J. Ouyang, Ya. Wang, and W. Ding, *Journal of Physics D: Applied Physics* **53** (34), 345201 (2020).
4. D. A. Hammer and D. B. Sinars, *Laser and Particle Beams* **19** (3), 377. (2001).
5. A. S. Skryabin, A. V. Pavlov, A. M. Kartova, V. D. Telekh, A. E. Sytchev, N. V. Sachkova, and M. M. Serov, *Journal of Physics: Conference Series* **1250**, 012018 (2019).
6. S. I. Tkachenko, A. R. Mingaleev, V. M. Romanova, A. E. Ter-Oganes'yan, T. A. Shelkovenko, and S. A. Pikuz, *Plasma Physics Reports* **35** (9), 734 (2009).
7. V. M. Romanova, G. V. Ivanenkov, A. R. Mingaleev, A. E. Ter-Oganesyan, T. A. Shelkovenko, and S. A. Pikuz, *Plasma Physics Reports* **41** (8), 617 (2015).
8. W. Lochte-Holtgreven, *Plasma diagnostics* (Wiley, New York, 1968).
9. A. Pervikov, E. Glazkova, and M. Lerner, *Physics of Plasmas* **25**, 070701 (2018).
10. V. I. Oreshkin, K. V. Khishchenko, P. R. Levashov, A. G. Rousskikh, and S. A. Chaikovskii, *High Temperature* **50** (5), 584 (2012).
11. V. I. Oreshkin, V. S. Sedoi, and L. I. Chemezova, *Applied physics*, No. 3, 94 (2001) [in Russian].
12. V. M. Dorovskoy, L. A. Elesin, V. L. Stolyarov, A. V. Steblevskiy, L. I. Uryuchkoev, and D. V. Fillipov, *Applied physics*, No. 4, 28 (2006) [in Russian].
13. A. V. Pavlov, Yu. Yu. Protasov, V. D. Telekh, and T. S. Tshepanuk, *Scientific visialisation* **11** (3), 111 (2019).
14. J. Ternan, *Physics Letters A*. **115** (5), 230 (1986).
15. P. Graneau, *Physics Letters A*. **120** (2), 77 (1987).